

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ENGENHARIA MECÂNICA

PAULO GUSTAVO ISEPAN

WELLINGTON TOMAZELA DE JESUS

ANÁLISE DE IMPACTO BALÍSTICO EM VIDRO LAMINADO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2018

PAULO GUSTAVO ISEPAN
WELLINGTON TOMAZELA DE JESUS

ANÁLISE DE IMPACTO BALÍSTICO EM VIDRO LAMINADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Mario Van Thienen Silva.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Ponta Grossa
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Mecânica
Bacharelado em Engenharia Mecânica



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DE IMPACTO BALÍSTICO EM VIDRO LAMINADO

por

PAULO GUSTAVO ISEPAN E WELLINGTON TOMAZELA DE JESUS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 6 de dezembro de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Mario José Van Thienen da Silva

Orientador

Prof. Dr. Oscar Regis Junior

Membro Titular

Prof. Dr. Luis Gustavo Vieira Gonçalves

Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares

Responsável pelos TCC

**Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho**

Coordenador do Curso

– O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso –

Dedicamos este trabalho aos nossos
familiares pelos momentos de ausência e
muita saudade.

AGRADECIMENTOS

Em agradecimento a todos que fizeram parte das nossas vidas, que contribuíram de alguma forma para crescermos como pessoas e chegarmos a este tão sonhado momento. Este não é apenas a finalização de um ciclo de nossa trajetória é também o início de uma nova fase, de novos conhecimentos e aprendizados que levaremos conosco onde estivermos.

Gostaríamos de agradecer a todos os nossos familiares, principalmente aos nossos pais, por todo o apoio, trabalho duro e dedicação que mantiveram durante todos esses anos, para que tivéssemos a chance de realizar este sonho. Vocês aguentaram firme a saudade, que também não foi pequena aqui do nosso lado, esperamos compensar tudo isso deixando-os sempre orgulhos do que nos tornamos.

Agradecemos também aos amigos que fizemos durante este período, vocês estarão sempre presentes conosco, seja num aprendizado que passaram, trabalhando juntos, ou naquela lembrança boa que recordamos.

Por final gostaríamos de agradecer ao nosso orientador Prof. Dr. Mario Van Thienen Silva, pelo apoio a pesquisa, os incentivos e todas as conversas para chegarmos ao resultado final deste trabalho.

RESUMO

ISEPAN, Paulo G.; JESUS, Wellington T. **ANÁLISE DE IMPACTO BALÍSTICO EM VIDRO LAMINADO**. 2018. 52p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

Desde o início da civilização o homem convive com confrontos diários pela sua sobrevivência, sejam estes contra animais ou principalmente contra o próprio homem. Estas disputas por comida, território e poder levaram ao desenvolvimento gradativo das ferramentas de batalha, como armas e instrumentos de proteção individual ou coletiva, a produção bélica tornou-se uma indústria forte e com uma voz ativa no mundo moderno. Este desenvolvimento armamentício trouxe a necessidade de se entender a fundo todos os fenômenos físicos presentes nos instrumentos de ataque e defesa, a fim de um sempre estar à frente do outro no momento da batalha. O trabalho realizado nesta monografia pretende avaliar a perda de energia em vidro para-brisa laminado, Tipo E, de forma teórica, utilizando-se da revisão bibliográfica para o estudo e aplicação da lei de conservação de energia, levando-se em consideração as limitações existentes para laboratórios, e de forma prática, apresentando uma metodologia simples que visa diminuir as variáveis do processo para testes de campo. O experimento prático consiste no estudo balístico da trajetória do projétil, para avaliar a perda de energia pós impactos. Estas avaliações formam a base para comparar se, a perda de energia proposta no equacionamento teórico se assemelha a perda de energia estudada no experimento de campo, concluindo se que a partir desse experimento levando se em conta a metodologia utilizada as energias encontradas são bastante discrepantes, portanto propor para novos projetos um estudo mais refinado que busque restringir cada vez mais as variáveis presentes nos processos, com a finalidade de se alcançar um resultado cada vez mais real.

Palavras-chave: Impacto. Balístico. Energias. Vidro laminado.

ABSTRACT

ISEPAN, Paulo G.; JESUS, Wellington T. **ANALYSIS OF BALLISTIC IMPACT ON LAMINATED GLASS**. 2018. 52p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

From the beginning of civilization man lives with daily confrontations for his survival, be they against animals or especially against man himself. These disputes over food, territory and power have led to the gradual development of battle tools, such as weapons and instruments of individual or collective protection, war production has become a strong industry with an active voice in the modern world. This development of arms brought the need to fully understand all the physical phenomena present in the instruments of attack and defense, in order to always be in front of each other at the time of battle. The work carried out in this dissertation intends to evaluate the loss of energy in laminated windshield, Type E, in a theoretical way, using the bibliographic review for the study and application of the law of conservation of energy, taking into account the limitations existing for laboratories, and in a practical way, presenting a simple methodology that aims to reduce the process variables for field tests. The practical experiment consists in the ballistic study of the trajectory of the projectile, to evaluate the loss of energy after impact. These evaluations form the basis for comparing if the proposed energy loss in the theoretical equation resembles the loss of energy studied in the field experiment, concluding that from this experiment taking into account the methodology used the energies found are quite dissimilar, therefore, to propose for a new project a more refined study that seeks to restrict increasingly the variables present in the processes, in order to achieve an increasingly real result.

Keywords: Impact. Ballistic. Energies. Laminated glass.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Projétil viajando no meio fluido - ar	15
Figura 2 - Esquematização das fibras primárias e secundárias de um impacto balístico	19
Figura 3 - Efeitos causados pela onda transversal numa fibra.....	20
Figura 4 - Marca de tiro no vidro da sede da UPP Nova Brasília, no Complexo do Alemão	24
Figura 5 - Evolução das microfissuras em delaminação	26
Figura 6 - Esquema demonstrando delaminação no modo II.....	27
Figura 7 - Vidro para-brisa.....	31
Figura 8 - Carabina Rossi .38 Special.....	31
Figura 9 - Munição .38 SPL + P CBC.....	32
Figura 10 - Suporte para os testes de campo	33
Figura 11 - Pontos de apoio e proteções	33
Figura 12 - Bases de apoio do suporte	34
Figura 13 - Alvo e marcação da mira para o atirador	35
Figura 14 - Controlador de distância	36
Figura 15 - Paquímetro utilizado nas medições	37
Figura 16 - Atirador posicionado na bancada.....	38
Figura 17 - Medição do impacto no alvo	42
Figura 18 - Comportamento do projétil.....	43
Figura 19 - Esboço dos impactos.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da velocidade de impacto e respostas típicas do alvo (Justo 1996)	17
Tabela 2 - Propriedades das fibras de vidro.....	29
Tabela 3 - Dados dos disparos sem anteparo.....	41
Tabela 4 - Dados de altura do impacto	42
Tabela 5 - Dados da distância referente a marcação.....	42
Tabela 6 - Análise dos dados referente aos impactos.....	44
Tabela 7 - Energia cinética antes do impacto.....	45
Tabela 8 - Dados do projétil pós impacto com vidro.....	46
Tabela 9 - Energia cinética pós impacto com vidro	46
Tabela 10 - Análise das energias cinéticas	46
Tabela 11 - Análise das energias dissipadas	47
Tabela 12 - Comparações das Energias dissipadas	48

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVO.....	11
1.1.1 Objetivo geral	11
1.1.2 Objetivos Específicos	12
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 PRINCIPAIS CONSIDERAÇÕES.....	29
3 METODOLOGIA.....	30
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	41
4.1 DISPAROS SEM ANTEPARO	41
4.2 DISPAROS COM ANTEPARO.....	41
4.3 CÁLCULO DAS ENERGIAS ENVOLVIDAS.....	45
4.3.1 Energia cinética do projétil antes do impacto	45
4.3.2 Energia cinética do projétil pós impacto	45
4.3.3 Energia dissipada no para-brisa.....	47
5 CONCLUSÃO.....	48
REFERENCIAS.....	49

1. INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da civilização, o homem utilizou-se do combate para atingir seus objetivos e impor sua ideologia. Com o avanço tecnológico os meios utilizados para este combate foram se aprimorando e a utilização da pólvora, em armamentos, deu outras proporções aos conflitos, surgindo assim as primeiras armas de fogo.

Segundo Tocchetto (2003, p.2), para que uma arma seja caracterizada como de fogo, esta deve conter três elementos indispensáveis, sendo esses: o aparelho arremessador, a carga de projeção (pólvora) e o projétil. O conjunto entre a carga de projeção e o projétil, caracterizam o cartucho.

Logo após a criação dos primeiros canhões de guerra, a tecnologia armamentista evoluiu e tornou-se cada vez mais acessível, dando início ao processo de armamento civil, o que fez com que o indivíduo passasse a utilizar dessa nova ferramenta para obter benefícios. Esse benefício individual nem sempre era para auxílio geral, fazendo com que certas pessoas utilizassem armas de fogo para cometer crimes contra o estado e a população.

Para alguns desses crimes, foi necessário começar a estudar o comportamento das armas de fogo para conseguir solucioná-los, dando início ao Estudo Forense para armas de fogo. Entre as áreas de estudo originadas por esse problema temos a Criminalística e dentro desta a Balística, que estuda o comportamento do projétil após esse deixar o aparelho arremessador.

Balística forense é uma disciplina, integrante da Criminalística, que estuda as armas de fogo, sua munição e os efeitos dos tiros por elas produzidos, sempre que tiverem uma relação direta ou indireta com infrações penais, visando esclarecer e provar sua ocorrência. (TOCCHETTO, D. 2003, p. 03).

Segundo GEORG et al. (2011), no Brasil, há uma classificação considerada geral entre os meios forenses creditada a Eraldo Rabelo de 1966, e que estabelece

cinco aspectos importantes a serem considerados nos exames laboratoriais de Balística Forense, sendo estes: o sistema de inflação, o sistema de carregamento, mecanismo de funcionamento, alma do cano e mobilidade e uso.

Na balística estuda-se também o impacto do projétil e todos os fenômenos originados desse. O impacto causa deformações na bala e/ou no alvo e se estudando essas deformações podem-se obter dados importantes na conclusão de laudos periciais. Informações que fazem com que coisas ocultas sejam reveladas e crimes desvendados.

Uma grande ferramenta para se estudar o impacto é a análise das energias envolvidas e suas formas de dissipação. Muitos trabalhos acadêmicos e científicos estudam essa energia de forma a poder ajudar na solução de crimes, proteção de pessoas e bens, além de procurar entender cada vez mais seus fenômenos físicos.

1.1 OBJETIVO

O presente trabalho é composto por objetivo geral e pelos objetivos específicos, voltados para a busca de dados e respostas que auxiliarão no desenvolvimento de novas pesquisas acerca do tema.

1.1.1 Objetivo geral

Utilizar-se da revisão bibliográfica sobre impactos balísticos para analisar de forma teórica e prática a dissipação de energia numa placa laminada de vidro.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar os cálculos teóricos propostos por Santos, J (2016), levando-se em consideração as limitações de laboratórios, softwares e materiais para testes.

- Realizar o experimento prático afim de obter dados reais do comportamento de impactos balísticos de alta velocidade, sempre procurando minimizar as variáveis envolvidas em experimentos de campo.
- Analisar de forma comparativa, os dados obtidos teoricamente e os dados do experimento prático, com o intuito de validar a teoria proposta pela revisão bibliográfica e contribuir para estudos futuros que visem pormenorizar e refinar os cálculos dos resultados.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado em capítulos, sendo o primeiro a introdução, na qual é abordada a problemática da pesquisa e sua motivação, a partir dos seus objetivos geral e específico.

O segundo capítulo é constituído pelo referencial teórico que traz uma revisão dos trabalhos acerca do tema, onde os autores irão analisar as teorias existentes para o estudo de dissipação de energia em impactos balísticos de alta velocidade em materiais compósitos e cerâmicos. Ainda neste capítulo são apresentados os parâmetros, as equações e as considerações efetuadas para se obter a projeção dos dados e posterior comparação analítica.

O terceiro capítulo do trabalho é a metodologia, a qual apresenta a classificação e as etapas para desenvolvimento da pesquisa e do experimento de campo.

Os resultados e análises serão expostos no quarto capítulo, e as considerações finais dos autores deste trabalho se encontram no quinto capítulo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

No estudo envolvendo armas de fogo, uma parte muito rica em informações a ser colhida é a área sobre o impacto do projétil originado pela mesma. Apesar de existir muitos estudos sobre esse impacto, o fato de existir muitas variáveis em seu meio acaba dando ainda mais possibilidades de estudo. Essas variáveis envolvem principalmente o projétil, desde sua composição e formação até como esse foi lançado, e o alvo em que esse atingiu.

O projétil sofre muitas influências desde seu disparo (acionamento do gatilho) até sua estagnação. No início do movimento, quando o míssil é ativado, o mesmo é expelido com uma força gigantesca. O cano da arma é utilizado para controlar a direção do projétil e para provocar efeitos desejados ao mesmo.

Quando se é acionado o gatilho e tem início o movimento do projétil, este é acelerado bruscamente e conseqüentemente atinge velocidades extremamente altas num período de tempo muito curto. Além desse impulso outros efeitos são aplicados ao objeto ao ser lançado.

O cano da arma é projetado com ranhuras que têm o intuito de fazer com que o projétil seja expelido com maior precisão e estabilidade. Essas deformações no cano provocam um efeito que faz com que o projétil saia girando em torno do seu próprio eixo para corrigir e eliminar efeitos contrários à sua trajetória. Essa rotação é feita para estabilizar o mesmo e diminuir o efeito que a resistência do ar impõe ao movimento, deixando-o com menos oscilações e um maior alcance. O estriamento faz com que o objeto tenha uma leve inclinação na trajetória para o sentido que as ranhuras se projetam.

O efeito que a gravidade exerce sobre qualquer corpo com massa não deixa de ser apresentado nesse estudo e todo o processo é feito com a força agindo e modificando a trajetória do objeto. O objeto descreve uma parábola, que é calculada de acordo com três equações para movimento uniformemente variado (MUV).

A Equação 1 é conhecida como Equação de Torricelli, onde V é o valor da velocidade final e V° é a velocidade inicial do projétil, ΔS é a variação de espaço deslocado pelo objeto analisado e a é a aceleração que o projétil está sujeito.

$$V^2 = V^{\circ 2} + 2a\Delta S \quad (1)$$

Outra equação que será utilizada para ajudar no cálculo da parábola é a Equação 2 onde é descrito o MUV em função do tempo, onde t é o tempo que o objeto se desloca.

$$\Delta S = V^{\circ}t + \frac{at^2}{2} \quad (2)$$

A Equação 3 também é utilizada em auxílio para descrever o movimento.

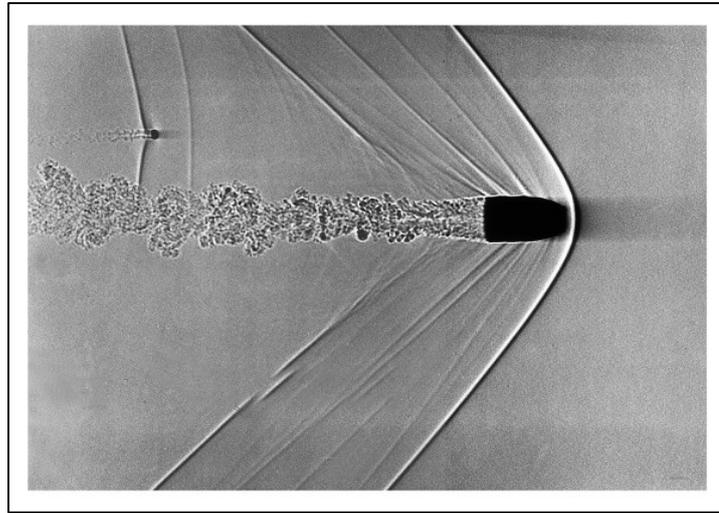
$$V = V^{\circ} + at \quad (3)$$

Será utilizado também no auxílio dos cálculos, uma relação trigonométrica afim de se encontrar o ângulo de disparo do projétil. A Equação 4 demonstra o cálculo que será realizado.

$$\tan \alpha = \frac{\text{Cateto oposto}}{\text{Cateto adjacente}} \quad (4)$$

O atrito é uma força que está agindo a todo momento em que o projétil está em movimento. O atrito do ar é a única força de atrito presente no movimento antes do impacto e é a força que exerce maior efeito sobre o projétil, reduzindo sua velocidade e algumas vezes mudando sua trajetória para os lados. A Figura 1 mostra como é o efeito de atrito do ar sobre o corpo balístico.

Figura 1 - Projétil viajando no meio fluido - ar



Fonte: Mathematical Art Galleries.

Pode-se observar que na ponta do projétil o ar é “empurrado” pela mesma e nesse ponto é exercido uma força de compressão pelo próprio ar. O Ar, como é um fluido muito pouco viscoso, se espalha para os lados dando efeito ao movimento. Após passar pela ponta do projétil o ar exerce uma força de fricção em suas laterais. Logo depois do final do projétil é feita uma força de sucção que é gerada pelo escoamento turbulento que o projétil gera. Todas essas forças são geradas pela força de atrito e são contrarias ao movimento e ajudam na dissipação de energia do mesmo (Santos, J. 2016).

Outro atrito que se encontra no processo é o atrito resultado da perfuração do projétil no alvo, que é dado pelo contato entre ambos. Esse contato gera uma resistência ao movimento do projétil e diminui drasticamente sua velocidade. O atrito por contato gera calor e som.

Um fator que é decaído constantemente por causa dessas forças opostas ao movimento é a perda de energia que o projétil carrega. Essas forças fazem com que o objeto perca velocidade ao longo de sua trajetória e conseqüentemente sua energia cinética também diminua. A energia que deixa a bala é transformada em vários tipos de energia fazendo com que a lei da conservação da energia seja validada.

A energia cinética (E_c) é expressa pela Equação 5 onde m é a massa do objeto e V é a velocidade que o objeto se encontra.

$$E_c = \frac{1}{2} mV^2 \quad (5)$$

O impacto do projétil em qualquer alvo fluido ou sólido, faz com que o mesmo tenha sua energia dissipada. Essa dissipação se deve ao fato da perda de velocidade que o objeto tem ao impactar com o alvo. A energia dissipada se dá de várias formas, entre elas tem-se a energia que o alvo absorve e é espalhada ao longo do mesmo, a energia sonora do impacto, a energia térmica que a bala deixa sobre o alvo entre outras. Energias absorvidas pelo local de impacto são transformadas em deformações no mesmo, alterando seu estado inicial e podendo causar acúmulos de tensões ao longo do local impactado dependendo do material.

O impacto balístico se caracteriza como o impacto de um projétil contra um alvo a uma velocidade alta, resultando em deformações tanto do projétil quanto do alvo. A energia cinética do projétil é transferida para o alvo que tem como intuito absorver o máximo possível desta energia e sua resposta possui efeitos de propagação de ondas de tensão compressivas.

O impacto balístico é normalmente o impacto que um objeto de baixa massa e alta velocidade propagado por uma fonte em um alvo. Como o impacto balístico é um evento de alta velocidade, os efeitos no alvo podem ser somente perto da localidade do impacto. Durante o impacto balístico, a transferência de energia passa do projétil para o alvo. (NAIK, N. K. e SHIRIRAO, P. e REDDY, B. C. K. 2006, p. 105).

A Tabela 1, apresenta a classificação das velocidades de impacto e as respostas típicas de alvos de materiais compósitos.

Tabela 1 - Classificação da velocidade de impacto e respostas típicas do alvo (Justo 1996)

Velocidade	Classificação	Resposta do alvo
≤ 250 m/s	Baixa Velocidade	A estrutura do alvo responde globalmente ao impacto, o esforço de resistência à penetração é feito por toda a estrutura do alvo.
500 a 2000 m/s	Alta Velocidade	A estrutura responde ao impacto localmente apenas uma pequena área ao redor do ponto de impacto oferece resistência a penetração e sofre dano.
> 2000	Hipervelocidade	Entre 2000 e 3000 m/s o alvo responde com um comportamento típico dos fluidos. Acima dos 12000 m/s observa-se vaporização do material ao ser impactado

Fonte: Santos, J. (2016)

Conforme definido por Silva et al. (2005) e Morye et al. (2000), limite balístico pode ser entendido como uma característica particular do par projétil/alvo que representa uma velocidade limite para estes. A velocidades V_{50} é a velocidade que o projétil atinge seu alvo com probabilidade de o perfurar de 50% e a V_0 é a velocidade com que o projétil perfura seu alvo, mas sai com velocidade nula.

Uma parte da energia também é absorvida pelo projétil, causando deformações no mesmo. A intensidade de deformação do projétil depende de vários fatores, as propriedades do alvo e do projétil são os principais fatores que interferem. A velocidade que o alvo colide também é levado em consideração. Os casos em que a deformação

é muito baixa são desconsiderados em cálculos devido a sua interferência ser insignificante.

Em todos os casos acima se tem a lei da conservação de energia atuando de forma constante, pois toda a energia que o projétil perde foi distribuída para o sistema. Com isso Santos, J. (2016) propõe a Equação 6 para modelar as energias do sistema:

$$E_{c^{\circ}} = E_{ci} + E_{cc} + E_{fp} + E_{fs} + E_{dl} + E_{fm} + E_{sp} \quad (6)$$

Onde:

$E_{c^{\circ}}$ = energia cinética do projétil no instante antes do impacto.

E_{ci} = energia cinética do projétil depois do impacto.

E_{cc} = energia cinética absorvida pelo movimento cone de face oposta.

E_{fp} = energia dissipada pela falha por tensão das fibras primárias.

E_{fs} = energia dissipada pela deformação das fibras secundárias.

E_{dl} = energia dissipada por delaminação.

E_{fm} = energia dissipada pela fissuração da matriz.

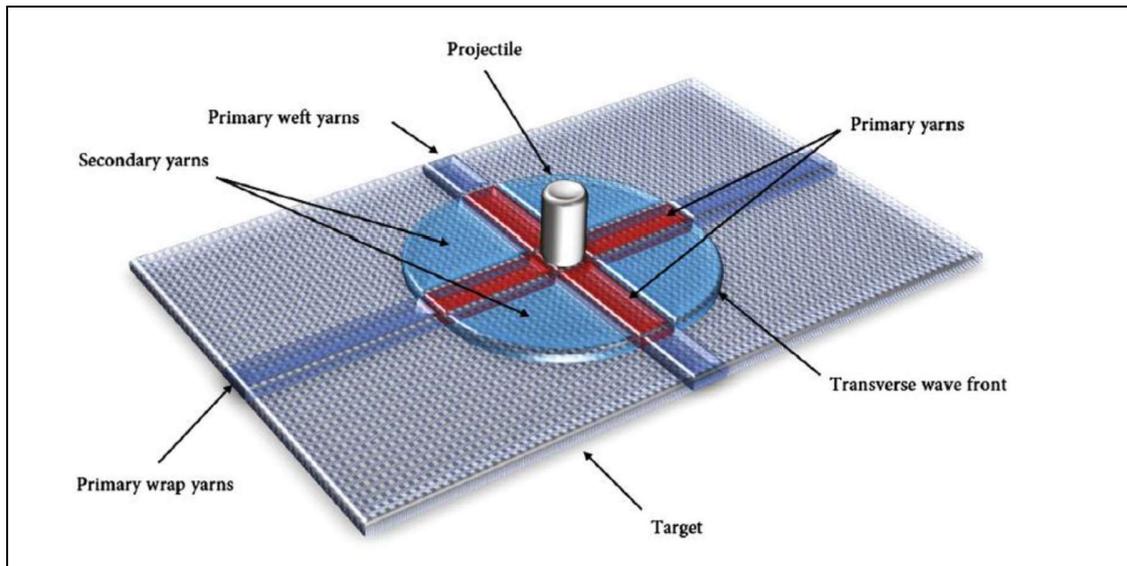
E_{sp} = energia dissipada por *shear plugging*.

Ao ocorrer o impacto balístico num alvo de compósito laminado, suas fibras são submetidas a tensões derivadas do projétil e essas primeiras fibras com contato direto são chamadas de fibras primárias e irão oferecer resistência a penetração, sofrendo as maiores tensões e atingindo a tensão de ruptura. Num raio envolto as fibras primárias encontram-se as fibras secundárias, que conseqüentemente sofrem tensões geralmente menores que as primárias, não chegando a romper e dissipando uma parte da energia derivada do impacto.

Devido ao impacto balístico se dar à altas velocidades seus efeitos são de ordem localizada e atingem um raio igual ao das ondas de deformação propagadas

pelo impacto, não danificando todo o alvo, o esquema a baixo demonstra visualmente o impacto balístico e seus efeitos.

Figura 2 - Esquemática das fibras primárias e secundárias de um impacto balístico



Fonte: Pasquali et al. 2015.

Estudos realizados por Smith et al. (1958) forneceram base para o equacionamento das velocidades de propagação das ondas elásticas, plásticas e transversas, levando a entender de forma mais clara a relação tensão – deformação e a propagação das ondas ao longo da fibra a partir de experimentos de impactos rápidos. As demonstrações do comportamento das fibras submetidas a impactos transversos foram utilizadas para trabalhos posteriores de impactos de alta velocidade.

A Equação 7 é utilizada para o cálculo da velocidade da onda transversa e auxilia no cálculo da área a qual o impacto afetará e os deslocamentos do alvo.

$$c_t = \sqrt{\frac{(1 + \varepsilon_p)\sigma_p}{\rho}} - \int_0^{\varepsilon_p} \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)} d\varepsilon \quad (7)$$

Onde:

c_t = Velocidade da onda transversa.

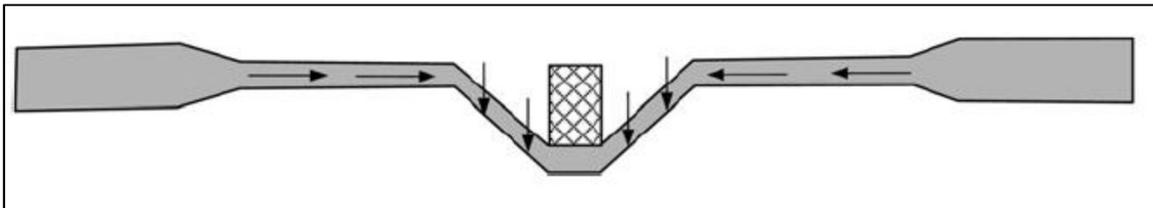
ε_p = Limite de deformação elástica

σ_p = Tensão de rotura das fibras primárias.

ρ = Densidade do material.

A Figura 3, a seguir, é um esquema do ensaio de impactos rápidos.

Figura 3 - Efeitos causados pela onda transversal numa fibra



Fonte: Mamivand e Liaghat 2010.

Desta forma, para Santos, J. (2016) o impacto balístico apresenta três configurações resultantes:

1. Perfuração onde o projétil atravessa o alvo e sai com uma velocidade não nula;
2. Perfuração onde o projétil sai com velocidade nula;
3. Penetração parcial, em que o projétil fica alojado no alvo e é incapaz de o perfurar.

Estes resultados possuem dependência direta com a capacidade do material constituinte do alvo em absorver energia. Na primeira situação o alvo não consegue absorver toda a energia imposta pelo projétil e este o perfura saindo com velocidade não nula. A segunda situação o alvo consegue absorver toda a energia, mas o

projétil consegue romper todas as camadas. Assim, a terceira situação ocorre quando o alvo absorve toda a energia e este não é perfurado.

Ocorrerá, portanto, a ruptura das fibras primárias, quando a tensão submetida a elas ultrapassar o limite da tensão de ruptura do material (alvo), o processo de deformação e posterior ruptura absorverá uma porção da energia cinética do projétil.

Ainda, segundo Santos, J. (2016), o mecanismo que descreve a forma com que as fibras primárias absorvem energia é descrito como: o comportamento de uma fibra impactada transversalmente e que origina ondas que se deslocam ao longo da fibra deformando-a e fazendo com que o material seja puxado na direção do ponto de impacto. Sendo que, as ondas elásticas (c_l^e) e plástica (c_l^p) originadas possuem velocidades de deslocamento, e a onda plástica é mais lenta que a elástica.

A Equação 8 representa o cálculo a ser realizado para encontrar a velocidade das ondas elásticas e a equação 9 para encontrar a velocidade das ondas plásticas.

$$c_l^e = \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)_{\varepsilon=0}} \quad (8)$$

$$c_l^p = \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)_{\varepsilon=\varepsilon_p}} \quad (9)$$

A velocidade das ondas será igual se o material apresentar linearidade na curva tensão – deformação para deformações elevadas.

O material é deformado e puxado para o ponto de impacto, deslocando-se transversalmente após a passagem da onda plástica com velocidade c_t (Smith et al. 1958).

A propagação das ondas se dá a partir do perímetro do projétil até se igualar a zero nos limites da área afetada pelo impacto. A posição das ondas em cada instante de tempo i é determinado multiplicando a sua velocidade pelo tempo decorrido (Parga-Landa e Hernández-Olivares 1195; Naik et al. 2006; Smith et al.

1958; Santos, J. 2016). A Equação 10 mostra como se encontra a distância percorrida pela onda transversa.

$$r_{ti} = c_t \Delta t \quad (10)$$

A Equação 11 mostra como se encontra a distância percorrida da onda plástica.

$$r_{pi} = c_p \Delta t \quad (11)$$

Onde:

r_{ti} = Distância percorrida pela onda transversa.

r_{pi} = Distância percorrida pela onda plástica.

Δt = Intervalo de tempo.

A energia dissipada pela ruptura das fibras é calculada utilizando a Equação 12 que leva em consideração o número de fibras primárias rompidas em cada instante de tempo e a energia dissipada por rotura das fibras primárias.

$$Efp = Nfp * efp \quad (12)$$

Onde:

Nfp = número de fibras primárias rompidas

efp = energia dissipada por rotura de fibras primárias

A energia dissipada por rotura de fibras primárias é encontrada pela Equação 13.

$$efp = 2\pi a^2 \int_0^{r_{ti}} \int_{\varepsilon=0}^{\varepsilon(x)=\varepsilon_{0i} * b^{x/a}} \sigma(x) d\varepsilon dx \quad (13)$$

Onde:

a = secção de impacto

ε_{0i} = deformação da fibra no ponto de impacto.

A deformação da fibra é encontrada pela Equação 14.

$$\varepsilon_{Oi} = \frac{\frac{d}{2} - r_{ti} + \sqrt{\left(r_{ti} - \frac{d}{2}\right)^2 + h_i^2}}{a \left(\frac{l_i}{b^a - 1}\right)} \ln(b) \quad (14)$$

Onde:

d = diâmetro do projétil

l_i = alongação da fibra

h_i = deslocamento do projétil e do alvo

a = seção transversal da fibra

b = fator de transmissão relativo a atenuação da tensão.

A alongação da fibra é dada pela Equação 15.

$$l_i = \frac{d}{2} + (r_{pi} - r_{ti}) + \sqrt{\left(r_{ti} - \frac{d}{2}\right)^2 + h_i^2} \quad (15)$$

O deslocamento do projétil e do alvo é dado pela Equação 16.

$$h_i = V_i \Delta t - d_{ci} \Delta t^2 \quad (16)$$

Onde:

d_{ci} = desaceleração

V_i = Velocidade do projétil antes do impacto.

A desaceleração utilizada na Equação é calculada pela diferença de velocidade entre dois instantes de tempo.

Silva, H. (2014), cita em seu trabalho que as fibras de vidro possuem um diâmetro variável entre 10 μm e 12 μm . Neste trabalho será utilizado um diâmetro médio das fibras (df) de 11 μm , já que não é possível chegar a um valor exato para cada corpo de prova.

A Equação 17, será utilizada para encontrar o número de fibras primárias rompidas (N_{fp}) no impacto, está equação se baseia no diâmetro do projétil (d) e no diâmetro considerado para as fibras de vidro (df).

$$N_{fp} = \frac{d}{df} \quad (17)$$

As fibras secundárias são responsáveis pela absorção de uma parte da energia do impacto, mesmo não sendo afetadas diretamente. As deformações por elas sofridas variam com o aumento da distância do ponto de impacto, e estas deformações diminuem com o aumento da distância até ser nula no raio máximo da onda.

De acordo com Morye et al. (2000), essa variação de deformação pode se assumir linear e a energia cinética do projétil transferida para as fibras secundárias será absorvida sob a forma de energia elástica.

Para se calcular a energia dissipada pelas fibras secundárias é utilizado a Equação 18, proposta por Santos, J (2016).

$$E_{fs} = \int_{\frac{d}{\sqrt{2}}}^{r_{ti}} \int_0^{\varepsilon(r)} \sigma(r) [2\pi r - 8\text{sen}^{-1}(\frac{d}{2r})] h dr d\varepsilon \quad (18)$$

A Figura 4, demonstra visualmente a marca de tiro num vidro onde é possível ver a propagação das ondas de energia dissipadas.

Figura 4 - Marca de tiro no vidro da sede da UPP Nova Brasília, no Complexo do Alemão



Fonte: Severino Silva / Agência O Dia.

A fissuração da matriz ocorre quando essa tem uma variação da tensão aplicada pela propagação de ondas que é gerada pelo impacto (SANTOS, J. 2016).

A energia dissipada por fissuração da matriz é dependente da percentagem da área afetada (X_{FM}), da energia dissipada por fissuração por unidade de volume (e_{FM}), a fração volumétrica da matriz (V_m), do fator A_{nc} que se refere à anisotropia do alvo e da variação do raio da área danificada (r_{iFM}). (SANTOS, J. 2016).

A Equação 19 descreve como se comporta e energia dissipada por fissuração.

$$\Delta E_{FM} = X_{FM} * e_{FM} * V_m * A_{nc} * \pi[(r_{iFM})^2 - (r_{(i-1)FM})^2] \quad (19)$$

O shear plugging é o processo onde o material sofre uma compressão ao longo da espessura que sofreu o dano, o que cria uma onda de compressão e uma onda de tensão fazendo com que o alvo tenha tensões de corte nesse perímetro e quando se atinge o limite da tensão de cisalhamento as fibras cedem a penetração do projétil e são arrancadas e levadas para as outras camadas. (SANTOS, J. 2016).

A Equação 20 descreve a velocidade de propagação da onda de tensão que percorre a área atingida.

$$\tau_i = \frac{F_i}{\pi d \left(\frac{G_i}{\rho}\right)^{1/2} \Delta t} \quad (20)$$

Sendo:

τ_i = tensão aplicada pelo projétil.

G_i = modo de rigidez do material.

F_i = força aplicada pelo projétil, sendo que essa força é dada por: $F_i = md \left(\frac{G_i}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$.

d = diâmetro do projétil

Mohan, S. e Valu, S (2014) fizeram um estudo que mostrou que o shear plugging só foi observado em impactos onde o projétil tinha a ponta plana. Em objetos com a ponta cônica ou arredondadas não se demonstrou esse fenômeno.

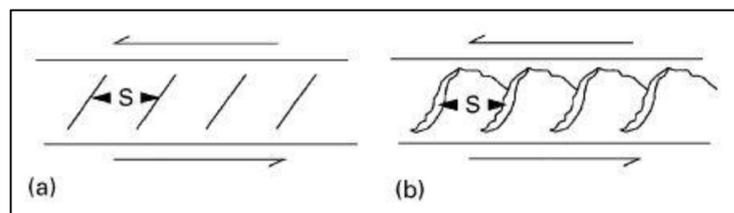
Na Equação 6, proposta por Santos, J. não se leva em consideração a energia gerada por fricção. Num modelo matemático proposto por Naik, N. e Shirirao, P. (2004) eles utilizam a energia por fricção para o cálculo, mas para analisar essa energia seria muito difícil em um ambiente não controlado e sem materiais muito sensíveis para avaliar temperaturas, portanto esta energia será desconsiderada nos cálculos.

O projétil poderá sofrer deformidades em seu corpo em alguns casos e essa deformidade poderá ocasionar alguns fenômenos excêntricos. A deformação do projétil ocorre quando esse passa a ter uma velocidade menor que velocidade de propagação da onda plástica no alvo. Quando a ponta do projétil atingir um tamanho de deformação de 1,25 o tamanho inicial poderá acontecer a perda de massa para o alvo. (NAIK, N. 2013).

O fenômeno da separação das camadas do compósito é uma consequência da fissuração da matriz. As microfissuras causadas na matriz reduzem a sua resistência Inter laminar. À medida que a tensão de corte aumenta, as microfissuras propagam-se e coalescem, formando fissuras maiores. A delaminação causada por impacto de um projétil a alta velocidade é do modo II, querendo isto dizer que a separação é feita por deslizamento entre lâminas. (SANTOS, J. 2016).

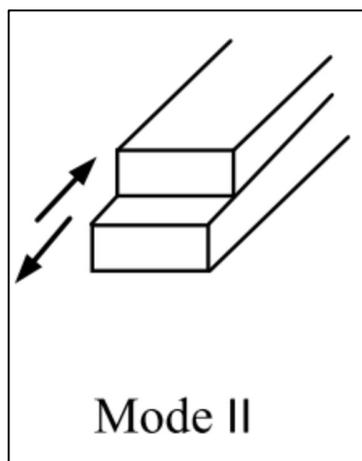
A Figura 5 demonstra como é o funcionamento das microfissuras por delaminação. O deslizamento quando ocorre delaminação pode ser visto de forma simplificada na Figura 6.

Figura 5 – Evolução das microfissuras em delaminação



Fonte: Lee 1995.

Figura 6 – Esquema demonstrando delaminação no modo II



Fonte: Benzerga et al. 2014.

O deslizamento dissipa energia e é dependente da energia liberada por delaminação de modo II (G_{II}), do percentual da área afetada por delaminação (X^{dl}) do fator de anisotropia e do raio da área afetada (ri_{dl}). A Equação 21 mostra a energia dissipada por delaminação.

$$\Delta E_{dl} = X^{dl} G_{II} A_{nc} \pi [(ri_{dl})^2 - (ri_{1dl})^2] \quad (21)$$

Modelos analíticos (Pasquali, 2015; Naik e Shirirao 2004), para simplificar as análises, consideram o ri_{dl} igual ao raio de fissuração da matriz, dizendo que os fenômenos de delaminação e fissuração acontecem ao mesmo tempo. A Equação 22 mostra o cálculo do ri^{FM} e do ri_{dl} .

$$ri_{dl} = ri^{FM} = \log_b \left(\frac{\varepsilon^{FM}}{\varepsilon_{oi}} \right)^a \quad (22)$$

Com o impacto e a criação de ondas transversais e longitudinais, o material sofrerá um deslocamento na direção do movimento. A onda transversal além de puxar o material para o ponto de impacto será responsável por provocar um cone de face oposta ao impacto fazendo com que o material dessa porção retire energia cinética do projétil.

A energia cinética do cone da face oposta é dada pela Equação 23.

$$E_{cc} = \frac{1}{2} m_{ci} V_i^2 \quad (23)$$

A massa do cone formado em cada instante (m_{ci}) é dada pela Equação 24 e é dependendo do avanço da onda transversa no alvo.

$$m_{ci} = \rho \pi h r t^2 \quad (24)$$

O próprio projétil é responsável por parte da perda de energia cinética ao atingir seu alvo, este dissipa sua energia deformando-se ou sofrendo erosão.

A erosão é o fenómeno de perda de massa do projétil. Quando a velocidade da interface do impacto projétil-alvo é maior do que a velocidade da onda plástica que percorre o projétil, esta não consegue afastar-se da ponta do projétil. Enquanto a velocidade do projétil for superior à velocidade de propagação da onda plástica acontecerá erosão reduzindo a massa total do projétil. Essa massa é extraída devido à pressão na ponta do projétil, que faz com que a temperatura aumente, desintegrando e derretendo pequenas porções do projétil. (SANTOS, J. 2016).

Segundo Silva, H. (2014), as fibras de vidro são compostas, em sua grande maioria, por sílica, contendo outros óxidos como, óxido de cálcio, de boro, de sódio, entre outros. “Estas fibras são produzidas com diferentes composições químicas e, consequentemente, possuem diferentes propriedades mecânicas e químicas”.

As fibras de vidro, são classificadas em diferentes tipos, que se baseiam na sua composição e aplicação. Estes tipos são: A, E, S e R. Para este trabalho será considerada fibras de vidro do tipo E, ou seja, um vidro borossilicato, com baixas quantidades de compostos alcalinos, elevadas propriedades mecânicas, um bom isolante elétrico e uma boa resistência à humidade, tornando-a ideal na utilização em para-brisas automotivos. A Tabela 2 indica as propriedades do vidro E a ser utilizado e outros dois exemplos.

Tabela 2 - Propriedades das fibras de vidro

Propriedade	Vidro E	Vidro S	Vidro R
Densidade (g/cm ³)	2,5	2,49	2,55
Módulo de Young (GPa)	73,0	85,5	86,0
Tensão de rotura (Mpa)	3400	4580	4400
Limite de deformação elástica (%)	4,4	5,3	5,2

Fonte: Silva, H. (2014).

2.1 PRINCIPAIS CONSIDERAÇÕES

Após a análise bibliográfica e um estudo acerca dos métodos de estudo e as limitações impostas para laboratórios e frequência de testes, este trabalho irá limitar-se a estudar apenas três mecanismos de absorção de energia, como proposto por Morye et al.(2000), e validado por Santos, J. (2016), são esses: rotura das fibras primárias, deformação elástica das fibras secundárias, e formação de um cone de face oposta ao impacto. A Equação 25 será a base para este estudo, sendo que a energia cinética do projétil depois do impacto (E_{ci}) será objeto de comparação com os testes balísticos a serem realizados, seguindo uma metodologia pré-definida.

$$E_{c^{\circ}} = E_{ci} + E_{cc} + E_{fp} + E_{fs} \quad (25)$$

Com todas essas informações e com o estudo de Santos, J. (2016) pretende-se com esse projeto validar a bibliografia encontrada de forma experimental em vidros laminados, Tipo E, de forma a contribuir com estudos periciais a longo prazo.

3. METODOLOGIA

Para se realizar o experimento prático e compará-lo aos resultados teóricos propostos por SANTOS, J. (2016) para materiais compósitos, será feito a montagem de um experimento prático seguindo as normas de segurança e normas de proteção individual, além de uma metodologia que procura garantir a veracidade dos resultados, limitando-se ao máximo as variáveis envolvidas em experimentos de campo, os disparos serão realizados por pessoas certificadas para manuseio de arma de fogo e em local restrito.

O experimento será realizado no clube de tiro de Ponta Grossa “Top Training”. Os disparos serão realizados por um instrutor especializado. Todas as normas de segurança do local serão respeitadas no processo. Essas normas são:

1- Todas as pessoas no local de disparo, na hora do mesmo, devem usar equipamento de proteção auricular.

2- Todas as pessoas devem permanecer atrás da linha de disparo, podendo entrar no campo de tiro apenas quando a arma não estiver em posse do atirador.

Neste experimento prático o material compósito submetido aos testes será o para-brisas de carros, que seguem as normas técnicas impostas pelos órgãos supervisores, estes serão obtidos em ferro velhos ou locais de descarte de peças de automóveis, sendo que o material poderá estar com trincas contanto que estas não estejam afetando a área de estudo do impacto. A Figura 7 mostra um exemplo dos para-brisas que serão utilizados.

Figura 7 - Vidro para-brisa

Fonte: Aatoria Própria

A arma de fogo utilizada para os testes e posterior comparação aos métodos teóricos será uma carabina calibre .38 que será alugada no clube de tiro onde os disparos serão realizados. A Figura 8 mostra a arma que será utilizada nos testes.

Figura 8 - Carabina Rossi .38 Special

Fonte: Aatoria Própria

O projétil utilizado nos testes será uma munição da marca CBC, com as especificações .38 SPL + P. Essa especificação representa que o projétil é de ponta

oca e o calibre é de aproximadamente de 0.38 polegadas. Hoje em dia o projétil .38 SPL + P possui um valor de diâmetro de 0,357 polegadas (9,0678 mm) e um peso de 0,125 Kg. A Figura 9 representa um exemplo de projétil que será usado nos disparos.

Figura 9 - Munição .38 SPL + P CBC



Fonte: Autoria Própria

Os disparos serão realizados a uma distância de 8 metros do para-brisa, em um primeiro momento, depois a distância entre o tiro e o para-brisa será reduzida para 5 metros, afim de aumentar a distância entre o impacto e o alvo. Serão efetuados seis tiros para validar os resultados, sendo três em cada distância. O para-brisa será instalado em um suporte que concede um ângulo apenas para apoio do mesmo.

Conforme pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 - Suporte para os testes de campo



Fonte: Autoria Própria

No suporte, como se pode ver na Figura 11, possui em seus pontos de apoio com o para-brisa partes de borracha que visam eliminar vibrações sujeitas ao impacto, além de garantir uma melhor aderência do vidro com o cavalete.

Figura 11 - Pontos de apoio e proteções



Fonte: Autoria Própria

Para garantir que o suporte não se movimente com o impacto, serão instaladas bases de apoio na sua parte traseira, como demonstra a Figura 12.

Figura 12 - Bases de apoio do suporte



Fonte: Autoria Própria

Para se analisar o impacto serão utilizados os alvos disponíveis no clube de tiro. Estes serão instalados a uma distância de 14 metros do disparo. Os alvos serão marcados numa mesma altura para que o atirador tenha um ponto de mira fixa. A Figura 13 mostra um exemplo do alvo com a marcação para a mira.

Figura 13 - Alvo e marcação da mira para o atirador



Fonte: Autoria Própria

Esses alvos terão a finalidade de, com a altura do impacto no mesmo e sua distância até o para-brisa, calcular a perda de energia do projétil após a mesma atravessar o compósito a ser analisado.

A distância entre o alvo e o local onde o para-brisa será instalado é medido por um controlador de distância do próprio clube de tiro. Esses controladores se encontram em todas as baias disponíveis. A Figura 14 mostra o controlador de distância.

Figura 14 - Controlador de distância

Fonte: Autoria Própria

Primeiro serão realizados três disparos sem obstáculos obedecendo a distância de 14 metros em direção aos alvos marcados, para se analisar onde os mesmos atingirão os alvos e estes resultados serão utilizados como base para os cálculos posteriores.

Após esses três primeiros disparos, será instalado um vidro para-brisa na primeira distância estipulada (8 metros). A troca do vidro será realizada a cada disparo e seus respectivos alvos também serão trocados e guardados, para análise posterior. A partir do quarto vidro amostral a distância entre o disparo será de cinco metros, conforme estabelecido previamente.

Antes da troca de cada para-brisa, será realizada a medição da distância da perfuração do impacto causado pelo projétil até o chão. Essa medida será mensurada com o auxílio de uma trena, onde a mesma deverá estar disposta com um ângulo de 90 graus para com o chão.

Os disparos acontecerão sucessivamente, sendo que ocorrerá apenas um disparo por conjunto (para-brisa-alvo). O desvio padrão e o coeficiente de variação serão utilizados para analisar a acurácia do atirador com base nos dados dos disparos. Esses valores serão utilizados com o intuito de analisar o quão perto os tiros foram da marca de maneira geral. O coeficiente de variação é a um fator encontrado dividindo o desvio padrão pela média aritmética dos disparos, quando mais baixo esse coeficiente, menos variação teve entre os disparos.

Para se encontrar a distância entre a marca de mira do alvo e onde o disparo acertou efetivamente, será utilizado o auxílio de um paquímetro digital da marca Mitutoyo 200mm com resolução de 0,01mm . A Figura 15 apresenta o paquímetro que será utilizado.

Figura 15 - Paquímetro utilizado nas medições



Fonte: Autoria Própria

O atirador estará apoiado em uma bancada afim de aumentar a precisão dos disparos. A Figura 16 mostra o atirador posicionado na bancada.

Figura 16 - Atirador posicionado na bancada



Fonte: Aatoria Própria

Com a perda de energia pelo impacto no vidro, esperasse que a velocidade do projétil após atravessar o mesmo seja relativamente menor do que a velocidade do mesmo caso não existisse o obstáculo. Com essa menor velocidade, a altura em relação ao solo com que ele atingirá o alvo, instalado após o vidro, será menor do que a altura com que ela atingiria sem o para-brisas como obstáculo. Essa diferença de altura será utilizada para calcular a energia cinética do projétil após impacto com o compósito.

Para mensurar a energia cinética posterior ao impacto, será utilizado a Equação 2 para calcular o tempo com que o projétil demora entre o para-brisa e o alvo através das componentes verticais do corpo de prova. A velocidade com que o projétil estava

no momento do impacto com o para-brisa é encontrada pela Equação 2 também, porém com as componentes horizontais da mesma. Em todos os casos é desconsiderado a resistência do ar no projétil. Substituindo essa velocidade na Equação 5, acha-se a energia cinética com que a bala atingiu o alvo.

Para se calcular a perda de energia do projétil, precisa-se ter também a energia cinética que o projétil teria se não tivesse nenhum impacto no percurso. Dados referentes a velocidade de um projétil regular expelido por uma munição de calibre .38 são obtidos verificando-se especificações do fabricante. Com a distância que ele percorreu, sabe-se bem precisamente sua velocidade no momento do impacto, sendo que as perdas de energia geradas pelo ambiente poderão ser ignoradas pois são as mesmas nas duas etapas do procedimento.

Após todas as análises mencionadas e encontrado a energia dissipada pela partícula lançada no impacto, será necessário encontrar a energia teórica proposta por Santos, J. (2016) e Morye et al. (2000). Para se calcular a energia teórica dissipada no impacto deverá ser utilizado a Equação 25, que envolve a soma de todas as energias a serem estudadas.

A energia cinética antes do impacto é encontrada do mesmo modo que na parte experimental, utilizando cálculos e aproximações. Nesse sistema a deformação do projétil é desconsiderada para o cálculo da energia pois a mesma é desprezível. Despreza-se também a energia do shear plugging pois o mesmo é encontrado apenas em projéteis com a ponta plana, o que não é o caso desse experimento.

Para se encontrar a energia dissipada pelas fibras primárias utiliza-se a Equação 12 em conjunto com as Equações 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16 e 17 para se obter o valor teórico proposto.

A Equação 18 possui uma resolução para métodos de volume finito, a área afetada pelas ondas secundárias não pode ser quantificada devido as restrições de materiais e laboratórios, tornando inviável a quantificação desta energia dissipada para cada corpo de prova. Com base nos dados encontrados por Pasquali, 2015, et al.(2015) para a porcentagem de energia equivalente dissipada pelo rompimento

das fibras secundárias, foi decidido que será considerado que a energia dissipada pelas fibras secundárias será 13,497 vezes maior que a energia dissipada pelas fibras primárias. Esse é o valor encontrado por Pasquali, 2015 em seu experimento utilizando um vidro tipo E semelhante aos vidros utilizados nesse trabalho.

As integrais serão resolvidas pelos pesquisadores e os mesmos irão utilizar o programa computacional Wolfram® no auxílio nas resoluções. Estes valores serão utilizados posteriormente para se chegar a um valor de energia cinética do projétil após o impacto (E_{ci}).

A energia dissipada pela energia cinética do cone da face oposta é o último cálculo de energia necessário para se obter a energia total dissipada pelo impacto. A primeira é calculada com o auxílio das Equações 23 e 24. Somando-se todas as energias no compósito na Equação 25 tem-se a energia total dissipada pelo impacto.

Assim após todas as energias teóricas e experimentais serem calculadas, os resultados obtidos podem ser expostos de maneira comparativa em tabelas para que os pesquisadores tenham uma visão geral dos dados e consigam validar de maneira conclusiva suas análises, podendo concluir se a teoria de SANTOS, J. se aplica de maneira real em experimentos de campo.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com a realização do experimento seguindo o método proposto foram retiradas as informações necessárias para o prosseguimento do trabalho, onde serão feitas as comparações e conclusões necessárias.

4.1 DISPAROS SEM ANTEPARO

Com os disparos realizados sem o para-brisa de impedimento para o projétil, foi obtido um alvo com três perfurações. Analisando o alvo com o paquímetro, obteve-se as distâncias do centro das perfurações para a faixa de mira.

As distâncias, o desvio padrão e o coeficiente de variação são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados dos disparos sem anteparo

Disparo zero		
Distância impacto/marcação (mm)	Desvio padrão	Coeficiente de variação
27,77		
23,90	2,95	0,12
21,97		

Fonte: Autoria Própria.

Como o objetivo dos disparos não era acertar o centro do alvo, e sim a faixa listrada do mesmo que se encontra a uma distância de 1405 mm do solo, pode-se ver que o atirador possui uma acurácia de alta qualidade já que o coeficiente de variação foi baixo entre os tiros.

4.2 DISPAROS COM ANTEPARO

Os disparos realizados sobre os para-brisas foram efetuados de acordo com a metodologia proposta e os dados da altura, referente ao chão, dos impactos nos anteparos estão representados na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados de altura do impacto

Medida da altura em relação ao chão						
Disparos	1	2	3	4	5	6
Altura (mm)	1257	1260	1275	1230	1211	1215

Fonte: Autoria Própria

A Tabela 5 mostra os dados mensurados para as distâncias entre a marca do impacto e a referência no alvo. Neste trabalho será considerado negativo os impactos que acertaram abaixo da marcação.

Tabela 5 - Dados da distância referente a marcação

Medida da distância relativa a marcação						
Disparos	1	2	3	4	5	6
Altura no alvo (mm)	-69,45	-26,87	23,89	-70,93	-135,28	-34,75

Fonte: Autoria Própria

A Figura 17 mostra como foi realizada a medição destas distâncias.

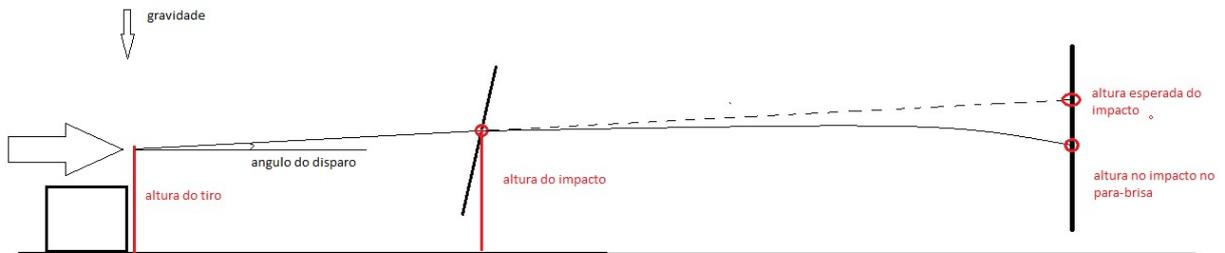
Figura 17 - Medição do impacto no alvo



Fonte: Autoria Própria

A Figura 18 mostra o comportamento do projétil de forma simples ao longo do disparo.

Figura 18 - Comportamento do projétil



Fonte: Autoria Própria

A altura do tiro será considerada constante, do valor de 1100 mm, já que o atirador estava sempre apoiado no mesmo lugar. A variação de altura dos impactos esperados é referente a variação do ângulo de saída do projétil, já que o mesmo sofre interferência humana no processo do disparo. A Equação 26 se baseia nessa variação de inclinação para calcular o decaimento do projétil, onde o cateto oposto (*cat op*) é a altura referente à frente do ângulo e o cateto adjacente (*cat ad*) é a distância até a altura.

$$\text{Tan } \alpha = \frac{\text{cat op}}{\text{cat ad}} \quad (26)$$

A Tabela 6 mostra os dados encontrados analisando a altura onde o projétil atingiu o para-brisa e o alvo, onde a altura do impacto referente ao chão é medida com a diferença entre a distância do impacto no alvo até a marcação, e a distância da marcação ao chão que é fixa em 1405 mm. A variação de altura descreve o decaimento do projétil em relação a altura esperada considerando o ângulo de saída.

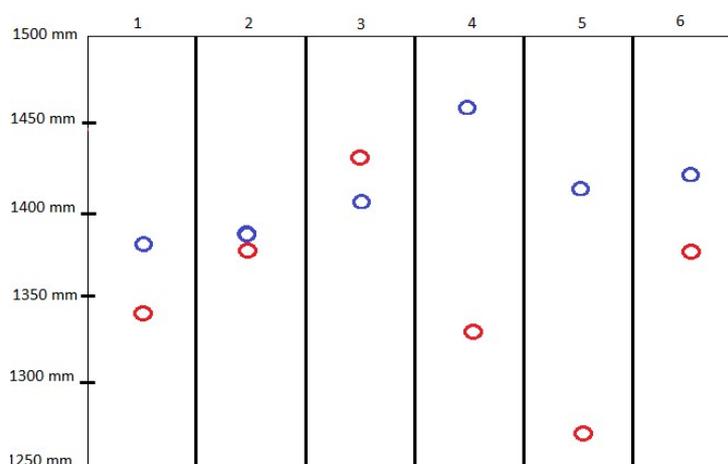
Tabela 6 - Análise dos dados referente aos impactos

Comparação dos impactos no para-brisa e alvo						
Disparos	1	2	3	4	5	6
Altura do impacto no para-brisa (mm)	1257,0	1260,0	1275,0	1230,0	1211,0	1215,0
Altura esperada relativa ao chão (mm)	1374,75	1380	1406,25	1464	1410,8	1422
α (graus)	1,12	1,15	1,25	1,49	1,27	1,32
Altura do impacto referente ao chão (mm)	1335,55	1378,13	1428,89	1334,07	1269,72	1370,25
Variação de altura (mm)	-39,2	-1,87	22,64	-129,93	-141,08	-51,75

Fonte: Autoria Própria

Percebe-se no disparo 3 que houve uma variação positiva referente ao disparo, o que é fisicamente impossível, portanto o disparo 3 será desconsiderado nas análises de resultados. Essa incoerência física pode ser resultado de medidas equivocadas realizadas pelos pesquisadores.

A Figura 19 faz referência a Tabela 6, afim de demonstrar visualmente os resultados encontrados para o experimento de campo e exemplifica a incoerência do disparo 3. Na figura em questão, as marcações em Azul são onde os disparos deveriam ter acertado caso não tivesse o anteparo de vidro, e as marcações em Vermelho onde o disparo acertou efetivamente.

Figura 19 - Esboço dos impactos

Fonte: Autoria Própria

4.3 CALCULO DAS ENERGIAS ENVOLVIDAS

4.3.1 Energia cinética do projétil antes do impacto

A velocidade com que o projétil sai da arma será considerada constante em todos os disparos e esse valor é obtido devido ao calibre e especificação do projétil, assim como seu peso. Com calibre 38 SPL + P possui um projétil de 158 gramas (0,158 Kg) e sai do cano com uma velocidade de 270 m/s. A partir dessas informações é possível encontrar a energia cinética a partir da equação 5. A energia cinética antes do impacto está representada na Tabela 7.

Tabela 7 - Energia cinética antes do impacto

Energia antes do impacto	
Velocidade (m/s)	270
Massa (Kg)	0,158
Energia Cinética (J)	5759,1

Fonte: Aatoria Própria

4.3.2 Energia cinética do projétil pós impacto

Utilizando as equações de corpo livre, Equação 2 e 3, é possível encontrar o tempo que o projétil ficou no ar entre o impacto ao para-brisa e o alvo. Com esse tempo é possível encontrar a velocidade de saída do projétil depois do impacto com o compósito laminado em cada caso. A Tabela 8, faz referência aos resultados encontrados.

Tabela 8 - Dados do projétil pós impacto com vidro

Análise das velocidades posterior ao impacto						
Disparos	1	2	3	4	5	6
Altura do impacto no para-brisa (mm)	1257	1260	1275	1230	1211	1215
Altura esperada relativa ao chão (mm)	1374,75	1380	1406,25	1464	1410,8	1422
α (graus)	1,1243	1,1458	1,2531	1,4894	1,2718	1,3176
Altura do impacto referente ao chão (mm)	1335,55	1378,13	1428,89	1334,07	1269,72	1370,25
Variação do tempo (s)	0,0894	0,0195	-	0,1628	0,1696	0,1027
Vy no alvo (m/s)	-0,7691	-0,0367	-	-2,5492	-2,7680	-1,0153
Vx no alvo (m/s)	67,1163	307,2911	-	55,2977	53,0676	87,6207

Fonte: Autoria Própria

A Equação 5 é utilizada para calcular a energia que o projétil tem ao sair do vidro.

A Tabela 9 mostra esses dados para cada evento.

Tabela 9 - Energia cinética pós impacto com vidro

Análise das velocidades posterior ao impacto						
Disparos	1	2	3	4	5	6
Vx no alvo (m/s)	67,116	307,291	-	55,298	53,068	87,621
Energia cinética pós impacto (J)	355,863	7459,797	-	241,569	222,477	606,514

Fonte: Autoria Própria

Com as propriedades do projétil encontradas é possível realizar comparações entre cada disparo. A Tabela 10 mostra como ficou a dispersão de energia cinética de cada projétil em comparação com e energia antes do impacto.

Tabela 10 - Análise das energias cinéticas

Comparação das energias cinéticas						
Disparos	1	2	3	4	5	6
Energia Cinética pós impacto (J)	355,863	7459,797	-	241,569	222,477	606,514
Energia Cinética pré impacto (J)	5759,100	5759,100	-	5759,100	5759,100	5759,100
Energia Experimental Dissipada (J)	5403,237	-1700,697	-	5517,531	5536,623	5152,586

Fonte: Autoria Própria

Analisando a Tabela 10 é possível observar, de imediato, que o disparo 2 teve uma energia cinética maior na saída do para-brisa do que quando o projétil saiu da carabina. Em todo movimento balístico onde não existe uma força atuando a favor do corpo, o mesmo não pode ganhar velocidade (consequentemente energia cinética). Quando se tem forças contrárias ao movimento do corpo, ele perde velocidade. O caso 2 será desconsiderado dos cálculos posteriores pois o mesmo não está respeitando as leis de movimento balístico.

No caso 3 pode ter acontecido algum erro de medição dos pesquisadores ou alguma interferência na hora do disparo que alterou as considerações no experimento, deixando o mesmo inviável para análise com o método escolhido.

4.3.3 Energia dissipada no para-brisa

Com as propriedades dos vidros e do projétil é possível encontrar as energias dissipadas no para-brisa propostas por Morye et al. (2000) e Santos, J. (2016). As Equações 18 e 23 foram resolvidas e a aproximação feita para a energia dissipada pelas fibras secundárias será 13,497 vezes superior que energia dissipada pelas fibras primárias. Os seus resultados estão apresentados na Tabela 11, onde a Energia Total Teórica Dissipada é referente a soma de todas essas energias.

Tabela 11 - Análise das energias dissipadas

Disparo	1	2	3	4	5	6
Ecc (J)	0,00228	-	-	0,00198	0,00212	0,00199
Efp (J)	25,0371	-	-	25,0371	25,0371	25,0371
Efs (J)	337,924	-	-	337,924	337,924	337,924
Energia Total Teórica Dissipada (J)	362,963	-	-	362,963	362,963	362,963

Fonte: Autoria Própria

Os resultados da energia teórica dissipada são basicamente iguais para os quatro casos analisados. Esse valor bem próximo um do outro se deve ao fato de apenas a espessura do vidro ser variável nos cálculos, e essa possui uma relevância muito pequena, já que os valores de espessura são muito próximos.

Todas essas energias são usadas para comparar os resultados experimentais e os resultados teóricos. A comparação é feita na Tabela 12, a seguir, onde os dados teóricos são somados para se encontrar o total de energia teórica dissipada pelo impacto e os dados de energia experimental dissipada é o resultado da diferença de energia inicial do projétil menos a de saída do para-brisa.

Tabela 12 - Comparações das Energias dissipadas

Disparo	1	2	3	4	5	6
Energia Teórica Dissipada (J)	362,963	-	-	362,963	362,963	362,963
Energia Experimental Dissipada	5403,237	-	-	5517,531	5536,623	5152,586

Fonte: Aatoria Própria.

Analisando a Tabela 12 percebe-se que os valores estão bem diferentes entre teórico e experimental. A validação da formula proposta por Santos, J. não pôde ser validada por esse experimento devido essa diferença considerável.

5. CONCLUSÃO

O motivo dessa diferença considerável durante o experimento pode ter sido a adoção de parâmetros incorretos no processo. Erros de medidas podem ter contribuído nessa discrepância dos resultados teóricos e práticos.

Esse foi um trabalho realizado a partir de medições sujeitas a erro humano e condições variáveis que não podiam garantir em sua totalidade a certidão dos resultados.

Por fim, a comparação dos resultados com o trabalho realizado por SANTOS (2016), tornou-se inconclusiva, não podendo ser afirmado se a teoria se aplica a experimentos de campo.

Abriu caminhos para estudos posteriores que utilizem da mesma metodologia refinando seus cálculos e minimizando as variáveis envolvidas no projeto.

REFERENCIAS

HALLIDAY D.; RESNICK R. e WALKER J. Fundamentos de Física: mecânica. Volume 1. 8ª edição. Editora LTC, 2009.

MAMIVAND, M. e LIAGHAT, G. H. A model for ballistic impact on multi-layer fabric targets. *International Journal of Impact Engineering* no. 37. 2010.

MOHAN, S. e VELU, S. Ballistic impact behaviour of unidirectional fibre reinforced composites. *International Journal of Impact Engineering* no. 63:164-176. 2014.

MORYE, S. S., HINE, P. J., DUCKETT, R. A., CARR, D. J. e WARD, I. M. Modelling of the energy absorption by polymer composites upon ballistic impact. *Composites Science and Technology* no. 60 (14):2631-2642. 2000.

NAIK, N. K., SHIRAO, P. e REDDY, B. C. K. Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: Formulation. *International Journal of Impact Engineering* no. 32. 2006.

PARGA-LANDA, B. e HENÁNDEZ-OLIVARES, F. An analytical model to predict impact behaviour of soft armours. *International Journal of Impact Engineering* no. 16. 1995.

PASQUALI, M., TERRA, C. e GAUDENZI, P. Analytical modelling of high-velocity impacts on thin woven fabric composite targets. *Composite structures* no. 131:951-965. 2015.

SANTOS, José A. da Silva. Métodos de Análise de Impactos Balísticos. 2016. 66 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto.

SILVA, M. A. G., CISMASIU, CHIOREAN, C. G. Numerical simulation of ballistic impact on composite laminates. *International Journal of Impact Engineering* no. 31 (3):289-306. 2005.

SMITH, J. C., FRANK, L. McCrackin e SCHIEFER, H. F. Stress-Strain Relationships in Yarns Subjected to Rapid Impact Loading Part V: Wave Propagation in Long Textile Yarns Impacted Transversely. *Textile Research Journal* no. 28. 1958.

SILVA, H.P. Comportamento Mecânico de Compósitos de Fibra de Vidro/Epoxy Nano-reforçados. 2014.240f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica na especialidade de Construção Mecânica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade de Coimbra.